

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2019.12.003

# 新型烟气超低排放技术研究与應用

Research and application of new flue gas ultra-low  
emission technology

张建通,王佃昌,王继伦

ZHANG Jiantong, WANG Dianchang, WANG Jilun

(华电国际山东信息管理有限公司, 济南 250014)

(Huadian International Shandong Information Management Company Limited, Jinan 250014, China)

**摘要:**为了满足日益严格的环保要求并降低工程设备投资、减少运行维护费用,以华电国际十里泉发电厂“上大压小” $2 \times 660$  MW 超超临界抽凝供热机组为例,对新型烟气超低排放技术的研究与应用进行了探索。机组取消了产生废水多、维护量大、耗电高的湿式除尘器,采取了全负荷选择性催化还原(SCR)脱硝+低低温静电除尘器+高效脱硫协同除尘FGDPlus+管束式烟气换热器(MGGH)的技术方案。机组连续运行2年多后,烟气排放一直满足超低排放要求,完全符合国家严格的环保要求,可为同类型机组建设或炉后超低排放改造提供参考。

**关键词:**烟气;超低排放;低低温静电除尘器;高效脱硫协同除尘;FGDPlus;低低温静电除尘器;湿式除尘器

中图分类号:X 701

文献标志码:A

文章编号:1674-1951(2019)12-0016-04

**Abstract:** In order to meet increasingly stringent environmental protection requirements, reduce investment in engineering equipment and maintenance costs, taking the “developing large units and suppressing small ones”  $2 \times 660$  MW ultra-supercritical condensing heating units in Huadian International Shiliquan Power Plant as an example, the application of gas flue ultra-low emission technology was studied. The units removed the wet separator that was of great waste water production, maintenance and power consumption, and adopted a full-load technical solution which was selective catalytic reduction (SCR) denitration + low-low temperature electrostatic precipitator + high-efficiency desulfurization collaborative dust removal FGDPlus + media gas-gas heater (MGGH). After more than 2-year operation, the flue gas emission has always met the ultra-low emission and strict national environmental protection requirements, which can provide a reference for the construction and ultra-low emission retrofit of the same-type unit.

**Keywords:** flue gas; ultra-low emission; low-low temperature electrostatic precipitator; high-efficiency desulfurization cooperative dust removal; FGDPlus; low-low temperature electrostatic precipitator; wet separator

## 1 研究背景

当前,我国环境污染形势十分严峻,环境治理需求迫切,因此,对燃煤电厂烟气超低排放、废水零排放、节能降耗等方面均提出了更加严格的要求。

2014年国家发改委、环保部、能源局联合下发了《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020年)》(以下简称《行动计划》),明确提出需全面落实“节约、清洁、安全”的能源战略方针,加快燃煤发电升级与改造,努力实现供电煤耗、污染排放、煤炭占能源消费比重“三降低”。《行动计划》进一步指出,新建燃煤发电机组应同步建设先进高效的脱硫、脱

硝和除尘设施,同时不得设置烟气旁路通道,以实现  
对大气污染物排放的严格控制。同年,山东省发改委、环保厅印发《关于尽快制定现役燃煤机组节能减排升级与改造计划的通知》,明确要求山东省现役300 MW及以上公用燃煤发电机组、100 MW及以上自备燃煤发电机组以及其他有条件的燃煤发电机组,经改造后的大气污染物排放质量浓度需达到燃气机组排放限值,即在基准氧体积分数为6%的条件下,烟尘、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 排放质量浓度分别不高于5, 35, 50  $\text{mg}/\text{m}^3$ (标态,下同)。

## 2 研究意义

在烟气超低排放方面,传统的燃煤电厂基本还未摆脱湿式除尘器的技术桎梏。在保证烟气超低排

放的前提下,尽可能降低投资、减少设备运行维护成本、减少废水排放、降低厂用电是目前燃煤电厂选择炉后环保设施时主要考虑的因素。对国内外技术路线进行充分调研后可以发现:与传统的采用湿式除尘器的烟气超低排放方案相比,不采用湿式除尘器不仅可以优化设备布置、减少设备投资和后续设备运行维护、实现节能降耗,而且可以杜绝脱硫废水产生、减少废水治理成本。在满足烟气超低排放的前提下,不采用湿式除尘器的方案在环保和节能 2 个方面均具有较大的优越性<sup>[1]</sup>。目前,国内外低低温静电除尘器、高效脱硫协同除尘、烟气脱硫(FGD) Plus 等烟气超低排放新技术逐步成熟,多项新技术联合应用就可以摆脱传统湿式除尘器的技术限制,同时实现烟气超低排放的目标。

### 3 研究路线

2015 年,华电国际十里泉发电厂“上大压小”2×660 MW 超超临界机组工程设计执行燃气机组超低排放标准。该工程建设的总目标是探索并应用一种新型烟气超低排放技术路线,建设节能、环保、高效机组。

烟气超低排放的关键和难点在于高效脱硫协同除尘系统与高效除尘措施的有效结合,以及炉后设备间的合理配合<sup>[2]</sup>。该工程借鉴日本燃煤电厂提出的“环保岛”概念<sup>[3-4]</sup>,引入全负荷选择性催化还原(SCR)脱硝、烟气余热利用、低低温静电除尘器(ESP)、高效脱硫协同除尘 FGDPlus 等先进技术,经过合理融合和充分论证,最终确定执行技术路线为:全负荷 SCR 脱硝技术+低低温静电除尘器+高效脱硫协同除尘 FGDPlus+管束式烟气换热器(MGGH),取消湿式除尘器方案。此技术路线在同类型机组中属于领先水平。超低排放技术路线如图 1 所示。

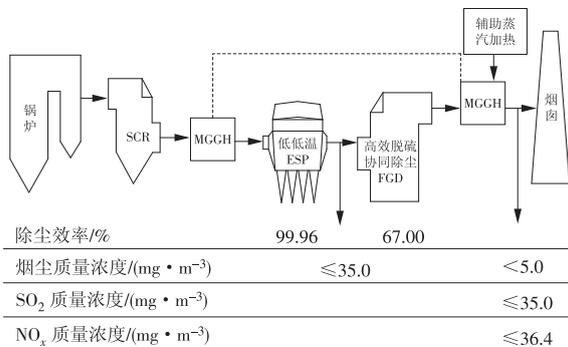


图 1 超低排放技术路线

Fig. 1 Ultra-low emission technology roadmap

#### 3.1 全负荷 SCR 脱硝技术

全负荷 SCR 脱硝技术是在高含尘区锅炉省煤器和空气预热器之间设置反应器,省煤器出口的烟

气垂直进入反应器,经过各层催化剂模块作用后,将  $\text{NO}_x$  还原为无害的氮气和和水。这一化学反应的允许温度为  $300 \sim 400 \text{ }^\circ\text{C}$ ,与省煤器与空气预热器之间的烟气温度相当<sup>[5-6]</sup>。SCR 技术的锅炉实际运行脱硝效率可达  $70\% \sim 90\%$ 。

该工程脱硝系统采用 SCR 脱硝装置,在设计煤种及校核煤种、锅炉最大连续蒸发量(BMCR)工况、处理 100% 烟气量条件下,这一脱硝装置的脱硝效率不低于  $86\%$ ,可以满足国家环保烟气排放要求。脱硝催化剂层数按 2+2 选型布置安装;脱硝装置可用率不小于  $98\%$ ;脱硝系统配备尿素热解制氨系统;在锅炉后竖烟井内布置气气管式换热器,利用锅炉高温烟气将引入的冷一次风(压力为  $12.5 \text{ kPa}$ ,温度为  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ )加热到  $450 \sim 650 \text{ }^\circ\text{C}$ ,作为脱硝尿素热解的热源。考虑到机组低负荷运行时较低温度烟气的影响,该工程同时预留了电加热器装置(每台锅炉按  $300 \text{ kW}$  预留)。

#### 3.2 低低温静电除尘器

根据静电除尘器供货厂家提供的多个运行项目资料,烟气温度与粉尘电阻率的关系曲线基本呈现为抛物线,如图 2 所示。

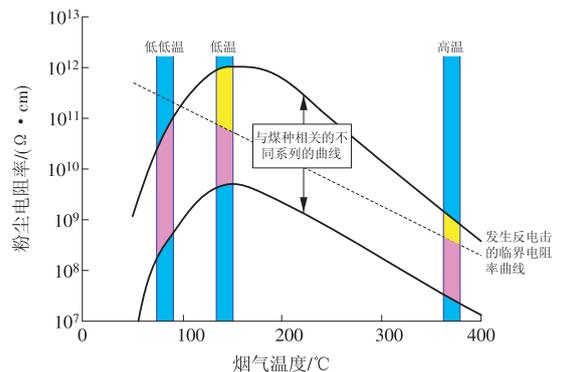


图 2 烟气温度与烟尘电阻率的关系曲线

Fig. 2 Relationship between flue gas temperature and soot resistivity

由图 2 可以看出:在低温区(低于  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ),粉尘导电主要依靠层粒表面吸附的水分或其他化学物质的离子进行,这种表面导电占优势的粉尘导电率称为表面电阻率,电阻率随着烟气温度的降低而降低;在高温区(大于  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ),粉尘层的导电主要依靠粉尘本体内部的离子或电子进行,这种本体导电占优势的粉尘电阻率称为体积电阻率,电阻率随着烟气温度的升高而降低;温度介于两者之间时,则表面电阻率和体积电阻率同时发挥作用,且电阻率处于抛物线的顶点区域,属于电阻率高点<sup>[7-9]</sup>。据此,一般燃煤电厂电除尘器设计选型时,工作温度要尽量避开电阻率较高的抛物线顶点区域。

试验研究证明了烟气温度与电阻率密切相关,

并直接影响电除尘效率<sup>[10]</sup>。分析认为,高温烟气经过换热降温后,体积流量降低,电场烟气通道内的低温烟气流速也相应降低;同时,烟温降低会导致烟气中的  $\text{SO}_3$  发生冷凝,形成液态粒子混合在烟气中形成气溶胶,酸性气溶胶具有极强的浸润性,在较高灰分的烟气环境中会快速与粉尘颗粒之间发生物理吸附和化学吸附,提高粉尘颗粒表面的电导率,进而降低其电阻率<sup>[11]</sup>。根据实测数据,烟气温度从  $100\text{ }^\circ\text{C}$  降至  $80\text{ }^\circ\text{C}$  的过程中,电阻率最大降幅可达 1 个数量级以上,可以使电除尘效率得到大幅提高,以满足更加严格的烟气排放标准。

该工程采用“烟气余热利用 + 低低温静电除尘”相结合的技术路线,建设独具特色的低低温静电除尘器,使电除尘器稳定运行在设计中的  $90\sim 110\text{ }^\circ\text{C}$  烟温区间,大幅降低电阻率,降低烟气量,提高运行电压,从而提高电除尘效率<sup>[12]</sup>。该工程实现了烟温调节、工况自动分析、反电晕自动检测控制及减功率振打等机电一体化协同控制,达到了系统运行最优、节能最佳的控制效果,低低温静电除尘器出口烟尘质量浓度低于  $15\text{ mg/m}^3$ 。

采用合理的余热利用装置降低静电除尘器里的烟气温度,主要有以下 4 方面的优势。

(1) 提高电除尘效率。降低烟尘电阻率,降低处理烟气量(即增加电除尘器的比积尘面积),提高电除尘器运行电压。

(2) 节能。低低温电除尘器系统中的余热利用换热装置可节省引风机电耗。

(3) 节水。节省脱硫工艺水约 30%。

(4)  $\text{SO}_3$  去除率高。 $\text{SO}_3$  去除率达 70% ~ 95%,可大幅减少下游金属设备的低温腐蚀。

### 3.3 高效脱硫协同除尘

该工程高效脱硫协同除尘系统按 1 炉 2 塔、3 层喷淋层、双塔双循环的方案设计建设。设计脱硫效率不低于 99.37%,一级吸收塔脱硫效率为 85.00%,二级吸收塔脱硫效率为 96.00%,吸收塔除尘效率为 70.00%,出口烟气中  $\text{SO}_2$  质量浓度小于  $35\text{ mg/m}^3$ ,粉尘排放质量浓度小于  $5\text{ mg/m}^3$ 。

在脱硫吸收塔入口和喷淋层之间增加一层 FGDPlus,并通过计算流体动力学(CFD)模拟,对吸收塔尺寸、FGDPlus 设计参数以及喷淋层及喷嘴的布置进行了优化,大幅提高了脱硫效率,与空塔喷淋相比实现了较低的运行电耗。该工程的 FGDPlus 经奥地利能源与环境公司(AEE)计算选型后建设,管径为  $80\text{ mm}$ ,管净间距为  $60\text{ mm}$ 。FGDPlus 技术特点如下。

(1) 形成持液层,强化烟气与浆液的接触,提高

脱硫和除尘能力。在传统的空塔喷淋中,烟气和浆液接触是通过吸收塔浆液喷雾来完成的,喷雾液滴的表面和烟气接触,去除烟气中的  $\text{SO}_2$ 。将 FGDPlus 安装在烟气入口和第 1 层喷淋层之间,大量的循环浆液会在 FGDPlus 上形成一个稳定的持液层,为烟气和浆液提供了最为紧密的接触环境,降低了气液两相的反应阻力,增加了传质面积;同时,烟气穿过持液层,增加了烟气和浆液接触反应的时间。浆液穿过 FGDPlus,可以使脱硫能力增强 20% ~ 30%,烟气中夹带的大部分粉尘通过 FGDPlus 表面形成的持液层后得以去除,提高了除尘能力<sup>[13-17]</sup>。

(2) 对进入吸收塔的烟气进行整流。在传统的空塔喷淋中,烟气靠每次穿过喷雾层实现整流,即通过连续喷淋浆液阻力来重新分布烟气。但实际运行中,连续喷淋浆液时烟气已经通过了大部分吸收区,未能充分利用所提供的液气比。不均衡的气体分布导致吸收塔截面上液气比不均匀,液气比高的区域  $\text{SO}_2$  和粉尘的去除效率高,而液气比低的区域  $\text{SO}_2$  和粉尘的去除效率低。吸收塔内原本分布不均匀的烟气在穿过 FGDPlus 上形成的持液层后,会尽量均匀地分布在吸收塔截面。FGDPlus 产生的阻力在气体和浆液刚接触时形成,并可以惠及吸收区。因此,浆液和烟气的接触在整个吸收区域都实现了优化<sup>[18-19]</sup>。

为进一步降低粉尘排放质量浓度,该项目采取了以下技术措施。

(1) 根据 CFD 流场模拟结果,烟气在经过 FGD-Plus 后、喷淋层之间、除雾器入口的速度分布偏差应不大于 15%,通过增加 FGDPlus,可使烟气在吸收塔内的分布满足以上要求。流场分布均匀程度的改善,有效提高了喷嘴出口液滴与粉尘颗粒的碰撞几率,从而提高了吸收塔内喷淋浆液对粉尘的脱除效率。

(2) 优化喷淋层布置,提高覆盖率。喷淋层间距由  $1.8\text{ m}$  提高到  $2.0\text{ m}$ ,延长烟气的停留时间,提高粉尘在吸收塔内的脱除效率。根据 CFD 流场模拟结果对喷淋层布置及喷嘴分布进行优化,改善浆液在塔截面分布的均匀性,单层喷淋层喷嘴的覆盖率可达 200% 以上。

(3) 优化喷嘴选型,降低液滴粒径,提高效率。喷嘴采用高效同向双头喷嘴,即同一方向上有 2 个喷嘴,2 个喷嘴喷出来的喷雾方向相反。采用此喷嘴可以产生粒径更小的雾滴(由常规的  $2\ 200\ \mu\text{m}$  降低到  $1\ 600\ \mu\text{m}$ ),有效增大气液接触面积。双头喷嘴喷出的浆液反方向旋转,在旋转的过程中发生碰撞,能够产生二次雾化,进一步增加液滴与烟气接触的

表面积,使得原本不能接触烟气的液滴内部转化为表面与烟气接触并反应,从而提高粉尘脱除效率。

(4)降低塔内烟气流速,提高粉尘捕捉几率。该项目吸收塔内烟气流速为 3.46 m/s,延长了烟气在吸收塔内的停留时间,进而增强了液滴捕捉粉尘颗粒的几率。

(5)降低除雾器出口烟气中液滴的质量浓度,减少液滴浆液颗粒夹带。除雾器出口烟气液滴中夹带的浆液颗粒是吸收塔出口粉尘的重要组成部分,尤其是针对粉尘排放质量浓度要求高的机组,此部分浆液颗粒能占吸收塔出口粉尘排放的 40% ~ 80%。因此,有效降低吸收塔出口烟气中液滴的质量浓度可以显著减少吸收塔出口的粉尘排放。

该工程脱硫吸收塔采用 FGDPlus 技术及相关措施后,脱硫效率可达 99.60%,除尘效率提高至 85% 以上,吸收塔出口烟气中 SO<sub>2</sub> 质量浓度小于 35 mg/m<sup>3</sup>,烟囱入口处烟尘质量浓度可降至 5 mg/m<sup>3</sup> 以下。

### 3.4 MGGH

设置 2 级换热器:在除尘器前设低低温省煤器,利用烟气余热加热凝结水,回收热量;在烟囱入口设烟气加热器,以循环水为媒介,吸收电除尘前的烟气热量,提高排烟温度至 75℃,消除或减轻烟囱出口“白烟”现象。

MGGH 装置水侧系统如图 3 所示。

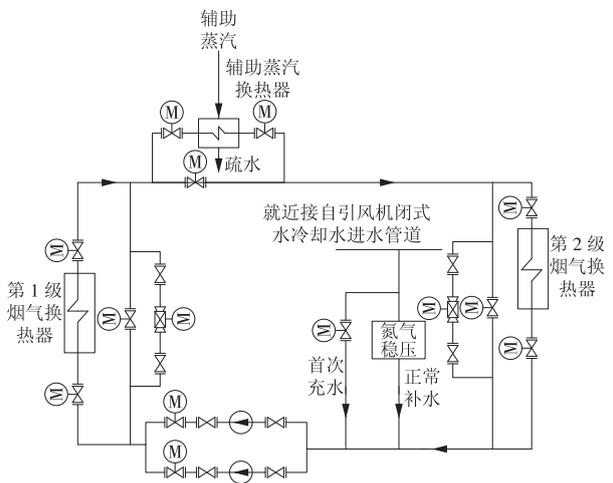


图 3 MGGH 装置水侧系统

Fig. 3 MGGH water-side system

## 4 应用效果

该工程机组投产后,2 台机组于 2017 年先后顺利通过环保验收,烟尘、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 等排放质量浓度均达到并优于国家最新标准,同时优于设计值,真正实现了不上湿式除尘器的同时超低排放。采用低低温静电除尘器,保证出口烟尘质量浓度为 6 ~ 15

mg/m<sup>3</sup>,降低了进入脱硫系统烟尘的质量浓度。二级吸收塔入口和喷淋层之间增加一层 FGDPlus,改善了烟气分布的均匀度,延长了烟气与浆液的接触时间,显著改善了脱硫效率及除尘效率。余热利用换热装置节省脱硫工艺水约 30%,投运余热利用装置时,SO<sub>3</sub> 脱除率达到 70% 以上,电除尘器出口烟气中 SO<sub>3</sub> 质量浓度大幅降低。由于不采用湿式除尘器,减少投资约 4000 万元。

## 5 结束语

本文介绍的超低排放技术路线真正实现了不上湿式除尘器的同时超低排放,可为后续新建火电机组或炉后超低排放改造提供参考。截至目前,新建机组已运行 2 年多,炉后烟气排放各项指标依然满足并优于国家超低排放要求,证明该项技术可以真正经受时间检验,应用前景广阔,社会效益显著。

### 参考文献:

- [1] 杨东月. 燃煤电厂烟气综合净化技术研究[D]. 北京:华北电力大学,2015.
- [2] 杜振,魏宏鸽,张杨,等. 高效脱硫协同除尘关键技术分析[J]. 中国电力,2018,51(6):37-41.
- [3] 汪胡根. 火力发电厂“超净排放”的“环保岛”技术[J]. 华东科技,2016(6):44-51.
- [4] 王凯亮,李善龙,汪洋,等. 燃煤电厂环保岛烟气超低排放技术[J]. 华电技术,2016,38(9):4-7.
- [5] 王凤池,靖长财,王晨. 600 MW 亚临界机组超低负荷脱硝技术研究与应用[J]. 锅炉技术,2018,49(4):16-19.
- [6] 孟文字,魏绍青,王菁,等. 330 MW 燃煤发电机组 SCR 脱硝系统催化剂磨损原因分析[J]. 锅炉技术,2018,49(1):10-16,21.
- [7] 徐艺畅. 关于某 600 MW 燃煤机组超低排放改造技术分析及应用效果探讨[J]. 中国高新区,2018(8):128-129.
- [8] 潘建强,尤良洲. 某 1000 MW 燃煤机组超低排放改造分析[J]. 华电技术,2018,40(1):59-61.
- [9] 孟俊亚,丁涛. 660 MW 燃煤机组锅炉袋式除尘器超低排放工程实例分析[J]. 华电技术,2018,40(12):66-68.
- [10] 尹连庆,王晶. 粉尘比电阻对电除尘的影响及改进措施研究[J]. 电力环境保护,2009,25(5):34-37.
- [11] 林翔. 低低温电除尘器提效及多污染物协同治理探讨[J]. 机电技术,2014(3):10-13.
- [12] 赵海宝,胡露均,何毓忠. 电除尘器“低低温+小分区”改造应用研究[J]. 电力科技与环保,2016,32(3):28-30.
- [13] 程卫. 提高石灰石-石膏湿法烟气脱硫效率的经验[J]. 安徽电力,2015,32(3):16-18.
- [14] 蔡维敏. 湿法烟气脱硫效率的影响因素分析[J]. 科技创新导报,2016,13(1):62,64. (下转第 24 页)

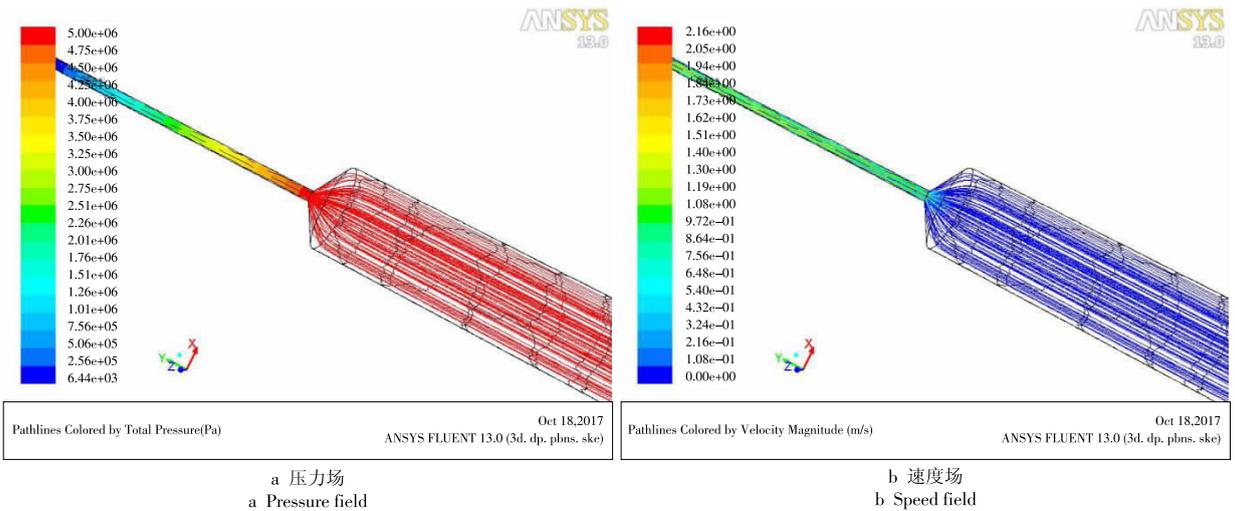


图 8 模型 6 流场模拟结果  
 Fig. 8 Simulation results of model 6 flow field

#### 4 结束语

本文为 SCR 蜂窝催化剂模具重要参数的设计提供了一种参考方法。将催化剂挤出过程中复杂的挤出环境简化为单一的模型,利用 ANSYS Fluent 软件进行模具内部挤出流场的模拟,主要分析了模具凸台、进料孔、缝宽等主要参数的变化对挤出的影响。

通过以上计算分析,可以得出模具部分设计参数对挤出存在以下影响:模具凸台增厚,有助于降低挤出速度,会使物料结合更加紧密,产品不容易出现裂纹等质量缺陷;模具进料孔直径增大也会降低出口端压力,破坏挤出过程的稳定;模具进料台厚度对出口压力的影响远不如凸台厚度,并且增加进料台厚度容易导致出料端面偏差增大,出现质量缺陷;随着模具的磨损,出料缝宽增加,模具出料量也相应增加,出料速度上升,出料压力相应下降,此时应提高挤出机转速,增加挤出压力以匹配出料量的增加。

本文设计的模型仅可以用于模拟单一变量对挤

出的影响,真实的挤出环境远比模型复杂。在研发阶段,使用流场模拟对挤出模具主要参数的设计提供数据支持是十分有效且高效的。针对更为复杂的设计,通过提高模型精度,引入更复杂的流向,同样可以起到参考设计的作用。

#### 参考文献:

- [1] 火电厂大气污染物排放标准:GB 13223—2011[S].
- [2] 熊春林,汤中华,李松林. 粉体材料成形设备与模具设计[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [3] 江培秋. 影响多孔陶瓷挤出成型工艺因素探讨[J]. 现代技术陶瓷,2004,25(1):6-9.
- [4] 何明腾,李国富,黄晓珍,等. 陶瓷泥料挤出成型过程挤出参数优化研究[J]. 硅酸盐,2014(3):526-530.

(本文责编:刘芳)

#### 作者简介:

秦一鸣(1990—),男,山东潍坊人,工程师,从事火电厂烟气脱硝催化剂生产工作(E-mail:qinym@chec.com.cn)。

改造[J]. 华电技术,2016,38(1):54-58.

(本文责编:刘芳)

#### 作者简介:

张建通(1966—),男,山东招远人,高级工程师,工程硕士,从事火力发电厂生产管理、基建管理和信息管理工作(E-mail:13863870777@sina.com)。

王佃昌(1988—),男,山东邹城人,工程师,从事火力发电厂生产基建管理工作。

王继伦(1974—),男,山东东平人,工程师,从事火力发电厂生产基建管理工作。

(上接第 19 页)

- [15] 刘定平,陆培宇. 旋流雾化技术在 464 000 m<sup>3</sup>/h 烟气湿法脱硫中的应用[J]. 中国电力,2015,48(8):130-134,140.
- [16] 谭学谦. 超大型机组湿法脱硫吸收塔喷淋系统设计优化[J]. 南方能源建设,2015,2(S1):98-100,104.
- [17] 杜振,魏宏鸽,张杨,等. 高效脱硫协同除尘关键技术分析[J]. 中国电力,2018,51(6):37-41.
- [18] 方宝龙. 燃煤电厂烟气近“零”排放技术方案浅析[J]. 科技与创新,2014(10):146,150.
- [19] 尹鹏飞. 国产 600 MW 超临界燃煤发电机组“近零排放”